

# ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОНИЦАЕМОСТИ ГРАНИЦ НА ТЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОЛИТА ПРИ ЭХО

Е.И.Филатов

*Казанский государственный университет  
Evgueny.Filatov@ksu.ru*

Типичное значение ширины межэлектродного промежутка  $a_m$  при ЭХО порядка 0.1 мм, тогда как радиус кривизны поверхности пера  $R$  обычно превышает 100 мм. Таким образом, типичные значения отношения  $a_m / R$  менее 0.01. Поэтому будем считать обрабатываемую поверхность плоской. Введем прямоугольную декартову систему координаты  $xoy$ . Обрабатываемая область (анод) ограничена замкнутой непрерывной кривой. Соответствующая поверхность инструмента – катод. Пусть  $h$  – ширина рабочего промежутка, то есть расстояние от поверхности катода до поверхности анода в направлении, нормальном к поверхности анода.

Будем считать, что поверхность детали меняется со временем только за счет съема металла, тогда как поверхность катода может меняться по заданному закону, например, вибрировать. Съем металла за малый промежуток времени  $\Delta t$ :  $\Delta h = \epsilon_{an} j_a \Delta t / \rho_{met}$ , где  $j_a$  – выход по току анодной реакции, заданная функция локальной плотности тока  $j$ ,  $\epsilon_{an}$  и  $\rho_{met}$  – электрохимический эквивалент и плотность обрабатываемого металла. Плотность тока  $j$  определяется выражением  $j = \kappa u_c \alpha / h$ , где  $\kappa$  – электропроводность электролита,  $u_c$  – разность потенциалов на электродах,  $\alpha = 1 - \Delta u_c / u_c - \Delta u_a / u_c$ ,  $\Delta u_c$  и  $\Delta u_a$  – потери напряжения на катоде и аноде, заданные функции от  $j$ . Электропроводность определяется выражением:  $\kappa = \kappa_0 (1 - \phi)^{1.5} [1 - \chi(T - T_0)]$ , где  $\kappa_0$  – электропроводность при температуре  $T_0$ ,  $\phi$  – газосодержание электролита,  $\chi$  – температурный коэффициент.

Так как  $\kappa$  зависит от гидродинамических параметров электролита, то для расчета съема металла необходимо рассматривать течение электролита в рабочем зазоре. Принимая во внимание, что ширина зазора много меньше его длины, можно осреднить гидродинамические уравнения в направлении, нормальном к поверхности детали. Электролит будем считать двухфазной смесью несжимаемой жидкости (водный раствор соли) и газа (смесь воздуха и водорода, выделяюще-

гося в процессе реакции). Будем считать, что часть объема  $(1-\phi)$  занята жидкостью, а часть  $\phi$  – газом. Тогда уравнения сохранения массы для каждого компонента можно записать в виде [1]:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_f) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_f v_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_f v_y) = j\eta_a \varepsilon_a, \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_h) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_h w_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_h w_y) = j\eta_h \varepsilon_h, \quad (2)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_a) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_a w_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_a w_y) = 0, \quad (3)$$

где  $\rho_f = h(1-\phi)\rho_f^0$ ,  $\rho_h = h\phi\rho_h^0$ ,  $\rho_a = h\phi\rho_a^0$ ;  $\rho_f^0, \rho_h^0, \rho_a^0$  – плотность жидкости, водорода и воздуха,  $v_x$  и  $v_y$  – компоненты скорости жидкости,  $w_x$  and  $w_y$  – компоненты скорости газа,  $\varepsilon_h$  – электрохимический эквивалент и выход по току для водорода в катодной реакции.

Следуя модели Х.А.Рахматуллина [2], будем считать, что давления газа и жидкости равны:  $p_g = p_f = p$ . В этом случае, складывая уравнения импульсов для фаз и пренебрегая отношением  $\rho_2/\rho_1$  по сравнению с единицей, получим уравнение сохранения импульса для смеси в целом в виде

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 v_x \bar{v}) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_1 v_y \bar{v}) = -h\nabla p - \bar{\tau}_f - j(\eta_a \varepsilon_a \bar{v} + \eta_h \varepsilon_h \bar{w}), \quad (4)$$

где  $\rho_1 = \rho_f$ ,  $\bar{v}$  – единая скорость смеси,  $\bar{\tau}_f$  – напряжение трения на электродах,  $\tau_f = \lambda_f(1-\phi)\rho_1 v^2/8$ ,  $\tau_{fx} = \tau_f v_x/v$ ,  $\tau_{fy} = \tau_f v_y/v$ ,  $\lambda_f$  – коэффициент трения [3].

В правой части уравнения энергии для жидкой фазы оставляем только джоулев нагрев  $Q$ :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_1 T_f) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho_1 v_x T_f) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho_1 v_y T_f) = \frac{Q}{c_p}. \quad (5)$$

Для газовой фазы принимаем:  $T_g = T_f = T$ .

Уравнение состояния для воздуха  $p_a = R_0 \rho_a^0 T / \mu_a$ , где  $p_a$  – парциальное давление воздуха,  $R_0$  – универсальная газовая постоянная,  $T$  – температура электролита, общая для всех компонент,  $\mu_a$  – молекулярная масса воздуха. Уравнение состояния водорода:  $p_h = R_0 \rho_h^0 T / \mu_h$ , где  $p_h$  – парциальное давление водорода,  $\mu_h$  – молекулярная масса водорода. Давление смеси определяется законом

Дальтона:  $p = p_a + p_h = R_0 \rho_a^0 T / \mu_e$ , где  $1/\mu_e = (1/\mu_a + \rho_h^0 / (\rho_a^0 \mu_h))$  – фактор сжимаемости. Уравнение состояния жидкой фазы:  $\rho_f = \text{const}$ .

Система уравнений решалась численно конечно – разностным методом Мак Кормака [4]. Рассматривались прямоугольные области, имитирующие форму компрессорных лопаток. Считалось, что часть  $L_1$  контура границы области представляет собой вход электролита в рабочий зазор. Часть  $L_2$  – выход из рабочей зоны. Часть  $L_3$  – боковые границы – является непроницаемой или частично проницаемой.

На входе  $L_1$  заданы входное давление  $p_i$ , температура  $T_i$ , газосодержание  $\phi_i$ , а также  $p_h = 0$  и  $v_y = 0$ . На выходе  $L_2$  давление равно давлению окружающей среды  $p_{out}$ . Остальные параметры свободны.

В случае, когда  $L_3$  является непроницаемой, на ней должны выполняться условия  $v_x = v_y = 0$ . Реально через боковые части границы протекает значительная часть общего расхода электролита, что существенно меняет картину течения в рабочем зазоре. Для моделирования этого фактора предполагалось, что вдоль боковых кромок лопатки задано некоторое дополнительное распределение давления, имитирующее влияние боковых уплотнений. При этом компоненты скорости на  $L_3$  остаются свободными.

Были проделаны многочисленные расчеты для рабочей области, первоначально заключенной между двумя плоскими прямоугольниками  $20\text{мм} \times 40\text{мм}$ , отстоящими друг от друга на  $h = 0.25\text{мм}$ . Электролит втекал между короткими сторонами прямоугольников и вытекал в остальные три щели.

Давление на входе вдвое превышало давление в окружающей среде.

Расчеты проводились для различных значений величины  $f$  – отношения расхода электролита через боковые щели к общему расходу. Если боковые щели непроницаемы, то  $f=0$  и получаем одномерное течение, когда все параметры зависят только от  $x$  (и  $t$ ). Если давление вдоль боковых границ равно давлению на выходе, то получаем при взятых условиях  $f=0.8$ . Соответствующие результаты для постоянного рабочего напряжения и неподвижного катода-инструмента показаны на рис. 1 – 8, где длина показана в метрах, скорость – в метрах в секунду, давление – в атмосферах, съем металла – в микронах, температура отнесена к  $T_m$ , газонаполнение безразмерно.

На рис. 1–5 приведены результаты расчетов для случая  $f=0.8$ . На рис. 1 и рис. 2 показаны линии постоянных значений компонент скорости. Видно, что картина распределения скорости симметрична относительно средней линии и существенно двумерна.

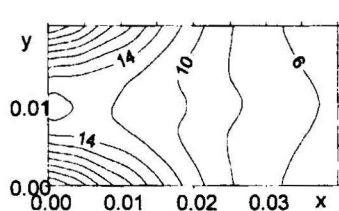


Рис. 1

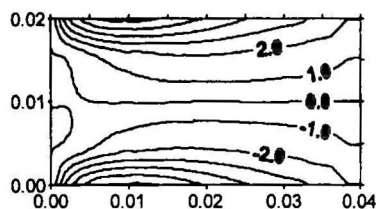


Рис. 2

На рис. 3, 4 и 5 таким же образом показаны линии постоянного уровня соответственно для газонаполнения, температуры и давления. Следует отметить, что распределения газосодержания и температуры – основных факторов, определяющих скорость съема, меньше отличаются от соответствующих одномерных, нежели распределения других параметров.

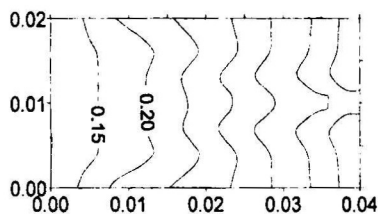


Рис. 3

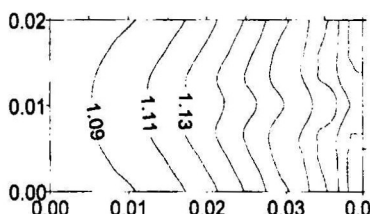


Рис. 4

На рис. 6–8 показан съем металла для случаев  $f=0.8$ ,  $f=0.5$  и  $f=0.2$  соответственно. Съем вычислялся за промежуток времени 0.02 секунды, так как это обычный период колебаний катода-инструмента при использовании промышленного тока.

Приведенные результаты позволяют сделать заключение, что по мере возрастания  $f$  от нуля до  $f=0.8$  картина распределения съема металла по поверхности лопатки все более отличается от одномерной. В то же время разница между наибольшим и наименьшим значениями съема при одном и том же значении  $f$  уменьшается приблизительно от 22% при  $f=0$  до 14% при  $f=0.8$ . Таким образом, растекание электролита в стороны уменьшает степень неравномерности обработки, повышая точность технологического процесса. Этот результат подтверждает важность учета двумерности распределения гидродинамических параметров в рабочем зазоре при ЭХО.

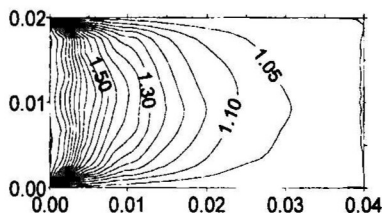


Рис. 5

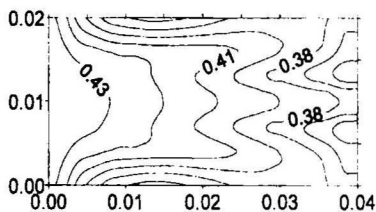


Рис. 6

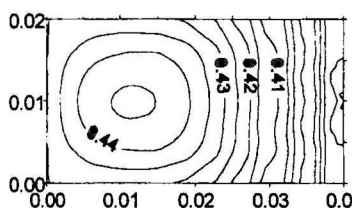


Рис. 7

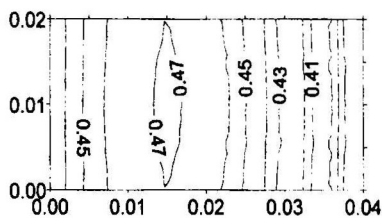


Рис. 8

## ЛИТЕРАТУРА

1. E.I. Filatov, *The numerical simulation of the unsteady ECM process.* // Proc. Int. Conf. on Advances in Production Engineering, 1998, Warsaw, Poland. – Part 2. – P. 213–220.
2. Р.И.Нигматуллин. *Динамика многофазных сред. Часть.1.* – М.: Наука, 1987.
3. А.И.Дикусар, Г.Р.Энгельгардт, В.И.Петренко, Ю.Н.Петров. *Электродные процессы и процессы переноса при электрохимической размерной обработке металлов.* – Кишинев: Штиинца, 1983.
4. C.A.J.Fletcher. *Computational Techniques for Fluid Dynamics. V.2* – Berlin: Springer-Verlag, etc., 1991.